PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2018 VOLUME 9 ISSUE 3 PAGES 909-926

https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0376

ON USING THE FACTOR ANALYSIS TO STUDY THE GEODYNAMIC PROCESSES OF FORMATION OF THE **G**REATER **C**AUCASUS

F. L. Yakovlev, E. S. Gorbatov

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract: The article describes the factor analysis procedure ensuring its correct usage for identifying the processes that cause formation of fold structures and the main layers of the continental crust in mobile belts. The proposed approach to this problem of geodynamics is specific: it aims at solving the inverse (rather than direct, which is common) problem of identifying the processes that led to the occurrence of a natural structure characterized by quantitative indicators varying within a certain range of values. The objectives of the study were to specify the number of main processes/factors, describe their nature and calculate their relative 'loading' values. The database included detailed structural profiles across the fold structure of the Greater Caucasus. A special method was applied to construct a balanced model of the sedimentary cover, considering 'structural cells' which are 5–7 km long along the profile. Each of the 78 'cells' studied was characterized by six parameters: the depth of the basement top at three stages of development (pre-folded, post-folded, and post-mountain-building), the amount of shortening, the amplitude of neotectonic uplifting, and the difference between the depths of the basement at the first and final stages. The parameters, that are directly related to the evolution of the blocks of the continental crust in the study area, constituted the initial data array for the factor analysis. In the first step, the Kaiser criterion was used to determine the number of factors, and it was equal to two. This number was specified for the main study using the methods of principal components with rotation. Factor 1 (Isostasy) amounted to 46 % of loading value, with high loads of the parameter of the depth of the basement top at stages 1 and 3. Factor 2 (Shortening) amounted to 40 %, with high loads of the indicators of shortening values and the amplitude of neotectonic uplifting. Factor 1 is related to the process of 'isostasy': after folding and orogeny is complete, the basement top of the 'structural cells' tends to return to its depth which was obtained on the pre-folded stage. Factor 2 is related to the process of shortening of the structure. The Chiaur zone was chosen as an example to analyze the Alpine-type development of the structures using the isostatically balanced model. The analysis shows that this zone formed as the density of the crystalline crust gradually increased to the 'mantle' values. Geodynamic modeling still fails to properly take such transformations into account. In the discussion of the results, attention is drawn to the fact that the established process of 'isostasy' is natural, i.e. not pertaining only to a theoretical model. It is noted that a geodynamic model can be correctly constructed if it considers the impacts of both processes revealed in this study. The obtained results can be used for improving the geodynamic modeling of fold-thrust mobile belts.

Key words: Greater Caucasus; folding; balanced section; restoration of fold structures; value of shortening; geodynamic process; factor analysis; isostasy

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: K.Zh. Seminsky

Received: May 30, 2018 **Revised:** August 17, 2018 **Accepted:** August 22, 2018

For citation: *Yakovlev F.L., Gorbatov E.S.,* 2018. On using the factor analysis to study the geodynamic processes of formation of the Greater Caucasus. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 909–926. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0376.

Для цитирования: *Яковлев Ф.Л., Горбатов Е.С.* Об использовании факторного анализа для исследования геодинамических процессов формирования Большого Кавказа // *Геодинамика и тектонофизика.* 2018. Т. 9. № 3. С. 909–926. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0376.



ISSN 2078-502X

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ БОЛЬШОГО КАВКАЗА

Ф. Л. Яковлев, Е. С. Горбатов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация: В статье рассматривается порядок корректного использования факторного анализа в целях выявления реально действующих процессов, формирующих складчатую структуру и основные слои континентальной коры подвижных поясов. Особенностью подхода к проблеме геодинамики является решение обратной (а не прямой, как обычно) задачи выделения тех процессов, которые привели к формированию природной структуры, имеющей ряд количественных признаков, обладающих определенным разбросом численных значений. Цель работы – уточнение числа основных процессов (факторов), описание их характера и выявление их сравнительной «силы». Рассматривается значение полученных результатов для разработки реалистичных геодинамических моделей. Исходным материалом работы послужили детальные структурные профили через складчатую структуру Большого Кавказа. По этим данным с помощью специального метода была построена сбалансированная модель осадочного чехла в объеме «структурных ячеек», размер которых составляет 5-7 км вдоль профиля. Было исследовано 78 таких «ячеек», которые характеризовались шестью параметрами: глубиной кровли фундамента на трех стадиях развития (доскладчатой, постскладчатой, посторогенной), величиной сокращения, амплитудой неотектонического поднятия и разницей глубин фундамента на первой и последней стадиях. Параметры имеют прямое отношение к истории формирования блоков континентальной коры региона и составляют исходный массив данных для факторного анализа. Первой операцией факторного анализа является определение числа факторов по критерию Кайзера; оно равнялось двум. Это число задавалось при основном исследовании несколькими методами (главных компонент с вращением). Был выявлен фактор 1, «изостазия», с весом 46 % и высокими нагрузками признаков глубины кровли фундамента на стадиях 1 и 3. Фактор 2, «сокращение», имел вес 40 % и высокие нагрузки признаков величины укорочения и амплитуды неотектонического поднятия. Первый фактор связывается с процессом «изостазии», который выражается в том, что после складчатости и горообразования кровля фундамента «ячеек» в целом стремится вернуться к своей глубине на доскладчатой стадии. Второй фактор связан с сокращением структуры. При анализе альпийского развития структур на примере Чиаурской зоны с использованием изостатически сбалансированной модели было показано, что ее формирование обусловлено последовательным увеличением плотности пород кристаллической коры до «мантийных» значений. Такие преобразования пока недостаточно учитываются в геодинамических моделях. При обсуждении результатов обращается внимание на то, что установленный процесс «изостазии» является природным, а не умозрительным модельным, а также на то, что корректная геодинамическая модель должна включать в себя результаты действия обоих обнаруженных процессов. Полученные результаты могут быть использованы при создании более совершенных геодинамических моделей формирования складчато-надвиговых подвижных поясов.

Ключевые слова: Большой Кавказ; складчатость; сбалансированный профиль; восстановление складчатой структуры; величина сокращения; геодинамический процесс; факторный анализ; изостазия

1. ВВЕДЕНИЕ. О ФАКТОРНОМ АНАЛИЗЕ И ВЫЯВЛЕНИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СКЛАДЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА И КОРЫ ПОДВИЖНЫХ ПОЯСОВ

Факторный анализ первоначально был разработан в начале XX в. в психологии, а затем с успехом был распространен, в частности, на социологию, биологию, медицину и географию, тем самым утвердившись в качестве общенаучного метода. Основная задача, решаемая с помощью факторного анализа, – сведение большого числа парных корреляций признаков в анализируемой совокупности данных к ограниченному набору не зависящих друг от друга факторов (скрытых связей между параметрами массива данных), внутренняя структура которых, возникшая в результате действия некоторых процессов, может быть интерпретирована определенным образом. Недавно этот метод многомерной статистики был использован для выявления двух геодинамических процессов (механизмов), ответственных за формирование складчаторазрывной структуры и за неотектоническое поднятие горной системы Большого Кавказа [Yakovlev, Gorbatov, 2017a].

В процессе выявления ограниченного числа внутренних связей (факторов), определяющих основные черты распределения параметров, решаются две последовательные задачи. Сначала выясняется число факторов, которые объясняют основную часть дисперсии данных. На следующей стадии выявляется характеристика факторов в виде двух параметров: объем объясняемой фактором дисперсии и его нагрузки (линейные корреляции) по каждому из исходных признаков (в работе [Yakovlev, Gorbatov, 2017а] – по шести). Анализируя факторные нагрузки каждого параметра, можно дать «физическое» объяснение того процесса, который отвечает за этот фактор. При этом в первую очередь необходимо учитывать параметры, которые имеют высокие нагрузки по одному из факторов и низкие - по остальным. Важным для нас положением факторного анализа является весьма субъективный, но эффективный критерий - в расчет принимаются те результаты анализа, которые имеют понятную интерпретацию, т.е. результаты, которые не могут быть разумно проинтерпретированы, не используются. При этом считается, что найденное решение должно соответствовать относительно простой факторной структуре, достаточной для описания главных свойств (дисперсии и корреляций) исходной совокупности переменных [Kim et al., 1989].

Как уже указывалось [Yakovlev, Gorbatov, 2017а], в области геологических наук факторный анализ обычно используется в исследованиях наборов численных данных - в геохимии, при исследовании временных рядов данных и т.д. За редкими исключениями, при изучении явлений, относящихся к геодинамике, факторный анализ ранее не использовался. Исследование формирования складчатой структуры Большого Кавказа и его воздымания как горного сооружения было целью одного из первых опытов применения факторного анализа. В результате было обнаружено, что совокупность шести параметров массива данных, имеющих отношение к истории формирования всей структуры в целом и структуры каждого из 78 объектов среднего размера, может быть интерпретирована как результат действия двух факторов - «сокращения пространства» и «изостазии». При этом были неточно определены порядок и вес факторов: F1 «сокращение пространства», его вес ошибочно был оценен в 67 % и F2 «изостазия» – имел вес 20 % ([Yakovlev, Gorbatov, 2017а], табл. 1). Ниже будут показаны уточненный порядок и корректное количественное выражение этих двух факторов.

Указанные два фактора «сокращения пространства» и «изостазии» (второй – как результат изменения плотности пород коры и мантии) являются одновременно геодинамическими механизмами или процессами, которые отвечают за формирование всей современной структуры, в данном случае - Большого Кавказа. В настоящее время используемые геодинамические модели складчатых и орогенных структур отличаются большим разнообразием; они имеют обычно характер умозрительных утверждений или решений прямых вычислительных задач, основанных на каком-либо одном механизме. Важно, что предварительное или последующее подтверждение его существования путем корректного сопоставления модели с природными структурами обычно не практикуется. В этих условиях получение прямых статистических данных о наличии вполне определенных геодинамических процессов (фактически при этом решается обратная задача) является весьма актуальной постановкой проблемы. В статье будет обсуждаться значение этого результата, а именно - существования двух указанных выше процессов (факторов), для разработки геодинамических моделей формирования континентальных блоков коры.

Заметим, что последние десятилетия исследования в области структурной геологии, тектоники и тектонофизики отмечены существенным расширением как объемов изучаемых объектов, в том числе по их глубине, так и арсенала методов и понятий за счет привлечения ряда современных общенаучных методических приемов и концепций. В отношении широкого спектра исследований механизмов формирования разломов, смежного по общему смыслу с исследованиями явлений складкообразования и возникновения больших деформаций в крупных блоках коры, следует отметить исследования С.И. Шермана и специалистов, принадлежащих к его школе. Так, С.И. Шерманом предложена стационарная и нестационарная модели строения крупных разломов, охватывающие глубокие слои коры и мантии, учитывающие изменения реологии пород и разные типы разрушения с глубиной, а также взаимоотношения разрывов разного ранга [Sherman, 2005; 2012]. Исследователями этой школы активно используются представления о фрактальной размерности разрывов и разломов, явлениях их самоорганизации; параметры явлений и процессов изучаются в количественном виде, и для описания их связей находятся уравнения, на современном уровне анализируется формирование сложных, внешне хаотических систем трещин (например [Sherman, Gladkov, 1999; Bornyakov, Sherman, 2000; Seminsky, Burzunova, 2007]). В этом отношении предлагаемое использование факторного анализа в целях диагностики геодинамических процессов, формирующих при развитии больших неупругих деформаций крупные структуры, и охват таким изучением более глубоких горизонтов коры и мантии лежат в русле одной из основных тенденций развития методологии исследований в тектонике.

2. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ БОЛЬШОГО КАВКАЗА

Напомним о характере материала, который исследовался факторным анализом. Основой работы послужили данные 24 детальных структурных профилей, пересекающих основные структуры Большого Кавказа в трех регионах. Общая длина профилей составила более 500 км. В результате использования специального метода [Yakovlev, 2009, 2015, 2017] по этим данным была построена сбалансированная модель структуры альпийского осадочного чехла Большого Кавказа, в которой по замерам параметров складок в масштабе «доменов» (ширина 0.5-1.5 км) были определены параметры структуры чехла в «структурных ячейках», ширина которых составляла около 5-7 км. Для проведения необходимых вычислений была введена трехстадийная модель развития региона, в которой считалось, что в конце первой стадии была накоплена вся мощность чехла, в конце второй стадии было реализовано всё сокращение структуры, но поднятие и размыв не происходили (это условие было введено для простоты расчетов), а на третьей стадии произошло неотектоническое поднятие и размыв верхней части структуры до ее современного состояния. Для всех 78 «ячеек» были определены значения шести параметров, имеющих отношение к истории развития структур (рис. 1):

(1) Исходная мощность чехла (1-я стадия) или глубина кровли фундамента (h1)*.

(2) Величина сокращения (Sh)* как функция изменения ширины «ячейки» (длины вдоль профиля) на стадиях 1 и 2.

(3) Глубина кровли фундамента на 2-й стадии после сокращения (h2).

(4) Глубина кровли фундамента на 3-й стадии после горообразования (h3).

(5) Амплитуда неотектонического поднятия (h3-h2)*.

(6) Разница глубин кровли фундамента между стадиями 1 и 3 (h3-h1).

Из шести параметров три являются измеренными (отмечены знаком *), остальные вычисляются.

Указанные параметры были получены следующим образом. В результате построения сбалансированной модели становится достоверно известной доскладчатая мощность средней части чехла, через которую проходит структурный профиль. Эта часть стратиграфической колонки дополняется по ряду соображений геологического характера (например, по картам фаций и мощностей) до полного стратиграфического разреза чехла, от подошвы нижней юры до кровли эоцена (параметр 1), формируя тем самым «стратиграфическую модель» ячейки. Величина сокращения (параметр 2) определяется по доскладчатой ширине «ячейки» на стадии 1 и по ее современной ширине (на стадиях 2 и 3). Средняя доскладчатая «стратиграфическая глубина» доменов, входящих в «ячейку», легко определяется по стратиграфическим подразделениям, выходящим на поверхность вдоль линии профиля, а также легко вычисляется их «глубина» после сокращения на стадии 2 (рис. 1). Зная среднюю топографическую высоту линии профиля, по этим данным определяется условная амплитуда неотектонического поднятия (параметр 5), а также, соответственно, современная глубина кровли фундамента (параметр 4) и разница глубин фундамента (параметр 6).

При первичном качественном анализе материала [Yakovlev, 2012] был установлен факт, что значения параметров 1 (глубина кровли фундамента на стадии 1) и 4 (глубина фундамента на стадии 3) для «структурных ячеек» в среднем по профилям стремятся быть очень близкими друг другу, несмотря на значительные отклонения их разности (параметр 6) вдоль профилей от нуля. Было сделано предположение о действии «изостазии», которая стремится сохранить эту глубину, несмотря на то, что сокращение структуры в процессе складчатости ее «заглубляет», а «неотектоническое поднятие» – «повышает» [Yakovlev, 2015]. Также ранее был сделан вывод о том, что «изостазия» связана с существенными изменениями плотности пород коры и мантии [Yakovlev, 2012, 2015].

Для изучения этого эмпирически обнаруженного явления были привлечены методы статистики. На первой стадии исследования полученного массива данных (78 объектов) были определены парные корреляции между перечисленными параметрами, которые в ряде случаев показали очень высокие значения [Yakovlev, 2008a, 2015; Yakovlev, Gorbatov, 2017а]. Были все основания полагать, что часть таких сильных корреляций имеет генетический смысл. Например, между параметрами 2 и 5 («сокращение» / «амплитуда поднятия») коэффициент корреляции составил 0.818, что может, на первый взгляд, указывать на то, что «амплитуда поднятия» является немедленным и прямым следствием «сокращения». Однако также можно было предположить, что прямая интерпретация найденных корреляций может оказаться некорректной, поскольку в формировании структуры с указанными параметрами может участвовать не один, а несколько процессов. Кроме того, природная структура имеет определенную историю развития и заметную продолжительность этой истории, поэтому на разных этапах активными в формировании структуры могут быть разные механизмы. Для анализа таких сложных процессов и



Рис. 1. Три стадии развития структуры (теоретические, в расчетных целях) и шесть признаков «структурных ячеек»: (*a*) – доскладчатая на конец осадконакопления; (*б*) – постскладчатая, доорогенная; (*в*) – современная, посторогенная. Использован профиль 21 Северо-Западного Кавказа (по [*Yakovlev, 2015*], с. 238); А, В, С, D, Е – пять «ячеек».

1 – отложения палеоцена и эоцена; 2 – меловые отложения; 3 – юрские отложения; 4 – палеозойский фундамент; 5 – положение усредненной линии профиля (для стадии 3) в «стратиграфической модели» ячейки на стадиях 1 и 2; 6 – положение признаков 1–6 для ячейки «С» (список признаков дается в тексте); синие стрелки показывают амплитуду поднятия (АП) между стадиями 2 и 3.

Fig. 1. Three stages of structure development (theoretical, for calculation purposes), and six indicators of 'structural cells': (*a*) – pre-folded at the end of sedimentation; (δ) – post-folded, pre-orogenic; (θ) – present-day, post-mountain-building. Profile 21 of the NW Caucasus (after [*Yakovlev*, 2015], page 238); A, B, C, D, and E – five 'cells'.

1 – Paleocene and Eocene sediments; 2 – Cretaceous sediments; 3 – Jurassic sediments; 4 – Paleozoic basement; 5 – positions of the mean profile line (for stage 3) in the 'stratigraphic model' of the cell for stages 1 and 2; 6 – positions of indicators 1–6 for cell C (the indicators are described in the text); blue arrows show the amplitude of uplifting (AII) between stages 2 and 3.

может быть эффективно использован факторный анализ.

3. Определение числа факторов или процессов и уточнение соотношения между факторами «сокращение» и «изостазия»

Для дополнительных уточненных расчетов нами использовалась та же стандартная программа «Statistica», что и прежде [Yakovlev, Gorbatov, 2017a]. При работе с программой для получения основного результата должно быть задано число факторов. Таким образом, в качестве первого шага вычислений было необходимо определить число факторов. Для этого рекомендуется применять разновидность факторного анализа - «метод главных компонент» (без вращения). Результат таких вычислений показан в таблице 1, в которой для трех факторов приведены «собственные значения», показывающие долю объясняемой ими дисперсии или меру разброса значений признаков. В сумме собственные значения всех факторов стремятся к числу переменных массива данных, в нашем случае - к

6. Число реально действующих факторов ограничивается теми, собственные значения которых больше 1 (критерий Кайзера); если значение меньше 1 (фактор 3 в нашем случае), то дисперсия меньше, чем дисперсия одной переменной. Это говорит о том, что этот выделяемый фактор является избыточным [*Kaiser, 1960; Kim et al., 1989*]. Таким образом, в нашем случае число реально существующих факторов равно двум.

Нагрузки факторов по параметрам, полученные на первом этапе вычислений по методу главных компонент без вращения, а также невозможность «генетической» интерпретации этих данных будут показаны ниже.

При последующих вычислениях задавалось число факторов. Основной результат в виде интерпретируемой матрицы нагрузок был получен путем выделения факторов по методу главных компонент с ортогональным вращением «Варимакс», геометрический смысл которого состоит в последовательном выявлении взаимно ортогональных осей многомерного облака исходных переменных; первая или главная ось совпадает с линией многомерной регрессии, относительно которой путем вращения

Факторы	Собственные значения	% общей дисперсии	Кумулятивные собственные значения	Кумулятивная дисперсия, %
1	3.614	60.23	3.614	60.23
2	1.592	26.53	5.206	86.77
3	0.726	12.10	5.932	98.86

Таблица 1. Определение числа факторов методом «главных компонент» без вращения

	Tabl	e 1.	. Determination	of the number	of factors by	y the method of	'principal co	mponents	without rotation
--	------	------	-----------------	---------------	---------------	-----------------	---------------	----------	------------------

этого облака максимизируется дисперсия данных. Проекции точек наблюдения на новые оси соответствуют значениям факторов, корреляции которых со значениями исходных переменных дают факторные нагрузки переменных. Хорошим результатом можно считать такое распределение нагрузок, при котором высокая нагрузка параметра по одному фактору сопровождается низким значением для него же по другому фактору. Такой результат существенно облегчает интерпретацию нагрузок.

Результаты расчетов в виде нагрузок на параметры, собственных значений факторов и доли объясняемой дисперсии показаны в таблице 2 (колонки 3, 4). Для контроля были дополнительно использованы некоторые другие стандартные разновидности факторного анализа с вращением, которые показали в основном очень сходные результаты (таблица 2, колонки 5-10). Как это видно из таблицы, в некоторых дополнительных видах анализа нагрузки одновременно по всем переменным меняли знак. Это явление не существенно, поскольку в интерпретации результатов факторного анализа важны абсолютные значения нагрузок. В этой же таблице для сравнения показаны плохо интерпретируемые нагрузки по уже упомянутому методу главных компонент без вращения, полученные на предварительном этапе (таблица 2, колонки 1, 2). Обращает на себя внимание то, что сумма собственных значений двух факторов во всех пяти случаях равна 5.21, что оставляет на гипотетический третий фактор только 0.79, т.е. меньше единицы. Таким образом, для первого этапа использование внутреннего статистического критерия (критерия Кайзера или суммы собственных значений) подтверждает сделанный ранее предварительный вывод [Yakovlev, Gorbatov, 2017а] о выделении именно двух факторов, а не одного или трех, для объяснения основной дисперсии шести параметров. Соответственно, на том уровне обобщения природной структуры, которую обеспечивают «структурные ячейки», вероятно для всей коры и части верхней мантии, эти данные указывают на активность в течение всего альпийского цикла только двух процессов формирования складчатой структуры и поднятия горного сооружения.

Напомним, что складчатые структуры можно рассматривать как иерархическую систему, имеющую семь уровней – от внутрислойных объектов до всего складчато-надвигового пояса [Yakovlev, 2008b, 2015]. В рамках этих представлений объекты на разных иерархических уровнях формируют разные «механизмы» и, соответственно, эти механизмы

Таблица 2. Нагрузки параметров при разных видах факторного анализа (выделение факторов методом «главных компонент»)

of 'principal components')											
Признаки	Без вращения		Свращением								
			Варимакс		Вариман	Варимакс нормализ.		Биквартимакс		Биквартимакс нормализ.	
	F ₁	F ₂	F1	F2	F1	F2	F ₁	F ₂	F1	F ₂	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0.596	-0.520	0.790	0.022	0.791	-0.014	0.790	0.033	0.790	-0.030	
2	-0.747	-0.599	-0.195	0.938	-0.186	-0.940	-0.209	0.935	-0.205	-0.936	
3	0.981	0.145	0.665	-0.736	0.657	0.742	0.675	-0.726	0.672	0.729	
4	0.858	-0.502	0.982	-0.158	0.980	0.169	0.984	-0.145	0.983	0.149	
5	-0.605	-0.742	0.005	0.957	0.015	-0.957	-0.008	0.957	-0.004	-0.957	
6	0.798	-0.373	0.853	-0.219	0.851	0.228	0.856	-0.207	0.855	0.211	
Соб. знач.	3.614	1.592	2.796	2.410	2.775	2.431	2.824	2.382	2.816	2.390	
Доля дисп. %	60.2	26.5	46.6	40.2	46.3	40.5	47.1	39.7	46.9	39.8	

Гаblе	2. Loads of the parameters calculated by factor analysis of differen	it types (factors identified by	the method
	of 'principal components')		

Таблица 3. Основной результат факторного анализа, нагрузки признаков по методу Варимакс с вращением (ГКФ – глубина кровли фундамента)

Признаки	F ₁	F ₂
1. исх. мощность (ГКФ), h1*	0.790	0.022
2. укорочение, Sh*	-0.195	0.938
3. ГКФ, стадия 2, h2	0.665	-0.736
4. ГКФ, стадия 3, h3	0.982	-0.158
5. амплитуда поднятия, h3–h2*	0.005	0.957
6. разница ГКФ (3-1), h3–h1	0.853	-0.219
Собственные значения	2.796	2.410
Доля дисперсии %	46.6	40.2

T a b l e 3. Main results of factor analysis. The loads of the indicators calculated by the Varimax method with rotation (ΓKΦ – depth of the basement top)

могут быть обнаружены и охарактеризованы. С этих позиций «геодинамические» механизмы «сокращение» и «изостазия», о которых говорилось выше, характеризуют формирование структур V уровня (тектонические зоны), которые по вертикали охватывают всю кору и, возможно, часть мантии. Предыдущий IV уровень, «структурные ячейки», занимает по вертикали осадочный чехол полностью. В пределах Большого Кавказа структуры на уровне осадочного чехла формируются кинематическими механизмами «квазиизгиба» в сочетании с «сокращением»; морфология складчатости здесь может осложняться также действием локального механизма «принадвиговой складчатости» в наклонных зонах простого сдвигания, что было показано специальными методами диагностики механизмов [Yakovlev, 2015, с. 385].

Для геодинамической интерпретации используем по-прежнему результаты анализа по методу Варимакс (таблица 2, колонки 3, 4; табл. 3; рис. 2). В таблице 3 выделены значения факторных нагрузок больше 0.7, совокупность которых должна подсказать «физический», геодинамический характер процесса, ответственного за возникновение тектонической структуры с такими сочетаниями значений параметров. Напомним еще раз, что прежний вариант ([Yakovlev, Gorbatov, 2017a], таблица 5, с. 1013), а также более ранние публикации ([Gorbatov, Yakovlev, 2016; Yakovlev, Gorbatov, 2016, 2017b]) содержат неточные сведения о порядке и весе двух факторов. Правильные данные представлены ниже в таблице 3, в которой фактор F1 выделяется несколько большим весом (46.6 %) и собственным значением (2.8), чем фактор F2 (40.2 %, 2.4).

Интерпретация фактора 1. В первом факторе одним из сильных параметров (параметр 1, «h1», нагрузка 0.790) является исходная глубина кровли фундамента (на стадии 1). В процессе эволюции структуры этот параметр возник первым, соответственно он не может быть генетически подчиненным. Другие два активных параметра имеют более сильные нагрузки, но, согласно истории развития структуры, они возникли позже, на стадии 3. Таким образом, они являются вторичными, генетически подчиненными. Это современная глубина кровли фундамента (параметр 4, «h3», нагрузка 0.982) и разница глубин фундамента (параметр 6, «h3-h1», нагрузка 0.853). Последний параметр, «h3-h1», не является самостоятельным, он вычислен по значениям первых двух. Таким образом, первый фактор генетически связан с глубиной кровли фундамента, возникшей в конце этапа осадконакопления, и он отвечает за сохранение ее глубины в результате длительного по времени действия двух процессов складчатости и горообразования, которые в основном действовали последовательно, сменяя друг друга. Как уже говорилось выше, этот фактор нами связывается с действием «изостазии», при которой в обязательном порядке заметно изменяются плотности пород коры и верхней мантии. Повторим, что вес фактора F1 в объяснении дисперсии составляет 46.6 %, собственное значение равно 2.8. В прежнем варианте [Yakovlev, Gorbatov, 2017a] этот фактор был вторым и имел меньший вес.

Интерпретация фактора 2. Во втором факторе, F2, основным сильным параметром является величина укорочения (параметр 2, «Sh», нагрузка 0.938), с ней связаны глубина кровли фундамента на стадии 2 (параметр 3, «h2», нагрузка -0.736; вычисляемый параметр) и возникшая позже, на стадии 3, амплитуда поднятия (параметр 5, «h3-h2», нагрузка 0.957; измеренный параметр). Из двух значимых параметров фактора 2 «величина укорочения» является первичным признаком, а «амплитуда поднятия» - вторичным, генетически подчиненным. Этот фактор нами связывается с сокращением пространства, при этом вопрос генезиса самого сокращения, внешнего или внутреннего, остается пока неисследованным, поскольку анализ этой проблемы выходит за рамки решаемой задачи. Повторим, что вес



Рис. 2. Диаграмма распределения параметров структурных ячеек в поле двух факторов (F1 – «изостазия», F2 – «сокращение»), показывающая силу и характер связи между ними. По координатам отложены абсолютные значения факторного веса признаков, их конкретные значения для признаков справочно показаны в таблице справа: 0 – отсутствие связи, ±1 – полная связь. Красные линии показывают значение нагрузки фактора 0.7, принимаемое за уровень статистической достоверности.

1 – положение параметра (красная точка – высокое значение в F1, синяя – в F2), рядом указано его обозначение; 2 – связи трех положений глубины кровли фундамента на стадии 1, доскладчатой (h1), стадии 2, после сокращения и складчатости (h2), и стадии 3, современной, после горообразования (h3); согласно принятой модели развития связь (h1) и (h2) имеет вычислительный характер, обусловленный сокращением; (h3) и (h2) связаны величиной неотектонического поднятия (h3-h2).

Fig. 2. Distribution of the parameters of the structural cells in the field of two factors (F1 – Isostasy, F2 – Shortening), which shows the load of the factors and their relationship. According to the coordinates, plotted are the absolute values of the factorial weight of the factors (the values are listed in the table): 0 – not related, ± 1 – fully related. Red lines mark the factor load (0.7), taken as the level of statistical reliability.

1 – position of the parameter (red dot – high value in F1, blue dot – high value in F2) and its symbol; 2 – relationships between the three depths of the basement top at stage 1 (pre-folded, h1), stage 2 (after shortening and folding, h2), and stage 3 (present-day, post-mountain-building, h3). In this model, the relationship between depths (h1) and (h2) is computational and caused by shortening; depths (h3) and (h2) are related to the amount of neotectonic uplifting (h3–h2).

фактора F2 в объяснении дисперсии составляет 40.2 %, собственное значение равно 2.4. В прежнем варианте [*Yakovlev, Gorbatov, 2017a*] этот фактор был первым и имел большой вес.

Возвращаясь к результатам анализа массива переменных по методу главных компонент без вращения (см. таблица 2, колонки 1, 2), можно увидеть, что нагрузки признаков в первом факторе имеют высокие значения, но они хаотичны (колонка 1) и не имеют явных преобладаний по какому-либо одному признаку. По второму фактору (колонка 2) только амплитуда поднятия превышает значение 0.7, по многим другим признакам нагрузки имеют средние значения и близки друг другу. Поскольку в первом факторе почти каждый признак имеет высокое значение, а во втором есть только один признак с высоким значением, вместе это не позволяет дать разумную интерпретацию результатов данной версии анализа. Таким образом, анализ по методу главных компонент без вращения имеет значение только для определения числа факторов. С позиций «физичности» анализ по методу главных компонент без вращения проводится в «натурных» координатах (по замерам параметров в природе в качестве осей координат), а не в координатах, привязанных к осям многомерного эллипсоида облака точек (метод главных компонент с вращением). С этих позиций форма облака точек в обсуждаемом методе остается неизученной, и результат анализа получается хаотичным. В том, что именно он отбрасывается, нет никакой предвзятости. Устойчивость основного решения подчеркивается большим сходством значений для модификаций основного метода (см. таблица 2, строки 3-4 / 9-10). Здесь надо напомнить, что результат получен на относительно небольшом массиве данных; если при дальнейшей работе этот массив будет дополнен материалом по другим тектоническим единицам, то результат может несколько видоизмениться.

Было проведено предварительное уточнение генетического соотношения двух процессов. Для этого проанализируем параметр 3 («h2») (это «глубина кровли фундамента после сокращения») на стадии 2. В структуре факторных нагрузок по методу Варимакс это единственный параметр, имеющий высокие значения для обоих факторов, -0.665 и -0.736, что хорошо видно на рисунке 2 (это уточненный рисунок 11 из [Yakovlev, Gorbatov, 2017а]). В связи с этим упомянутую выше сильную парную корреляцию (R=0.818) между параметрами 2 («сокращение») и 5 («амплитуда поднятия»), а также отсутствие корреляции между параметрами 1 («глубина кровли фундамента на стадии 1») и 2 («сокращение»), R=-0.023 ([Yakovlev, Gorbatov, 2017а], с. 1012), следует интерпретировать следующим образом.

По статистическому характеру имеющегося набора данных [Yakovlev, Gorbatov, 2017a] можно утверждать, что величина сокращения (или «интенсивность» складчатости) никак не связана с накопленной мощностью осадков; об этом говорит отсутствие корреляции признаков 1 и 2. Заметим, что в рамках геосинклинальной концепции ранее высказывались мнения о существовании такой прямой связи (например [Artyushkov, 1993], с. 292) чем больше мощность накопленного осадочного чехла, тем более развитая складчатость возникает. Далее можно предположить, что сокращение пространства на стадии 2 нарушает каким-то образом изостатическое равновесие (или параллельно приводит к увеличению плотности пород), но результатом в любом случае является существенное погружение всей структуры, точнее - погружение кровли фундамента. Это погружение не сразу, но восстанавливается в результате неотектонического поднятия всего сооружения Большого Кавказа к концу стадии 3. Это специально подчеркнуто на рисунке 2 знаком 2 (стрелками). Таким образом, амплитуда поднятия в обсуждаемой высокой корреляции «физически» скорее связана с запаздывающим действием изостазии как реакции соскладчатое погружение структуры.

В этом пункте интерпретации надо сразу заметить, что в принятой модели развития на стадии 2 формируется полностью погруженная структура. Это является, конечно, абстракцией, введенной в целях удобства вычислений, а не реальным событием, надежно зафиксированным в природной структуре. Фактически, для того чтобы понять, как глубоко при складчатости погружалась структура (с тем чтобы потом, на стадии 3, испытать поднятие), необходимо привлекать дополнительные данные. В этом качестве могут выступить, например, структурные признаки такого рода движений в соседних «структурных ячейках», которые указывают на неодновременные вертикальные движения. В настоящее время наиболее точными сведениями по вертикальным движениям считаются оценки поднятия по данным трекового анализа [Soloviev, 2008; Mosar et al., 2010], хотя в общем случае они достоверны только при одновременном определении реально существовавшего геотермического градиента. Более общим и надежным способом выявления вертикальных движений может выступить оценка объема соскладчатого размыва верхней части осадочного чехла. Пока можно говорить о таком размыве только как об осредненной величине на основании приблизительного объема майкопской серии (синхронной процессу складчатости, как предполагается [Yakovlev, 2015; Yakovlev, Sorokin, 2016]) в сравнении со всем объемом осадков предгорных прогибов. По этим данным такой соскладчатый размыв за время примерно с 30 до 15 млн лет составляет около 0.3-0.5 доли всего объема размытых и переотложенных за 30 млн лет пород верхней части осадочного чехла Большого Кавказа [Yakovlev, Sorokin, 2016]. Если указанные выше оценки справедливы, то точка «h2» параметра 3 на рисунке 2 при дальнейшем уточнении соотношения этих двух процессов может сместиться на диаграмме на некоторое расстояние вверх и влево, по направлению к точкам «h1» и «h3».

4. Возможные изменения строения коры Большого Кавказа в альпийском цикле развития

Если считать, что процесс «изостазии», а точнее – реакция литосферы на увеличение мощности коры при сокращении и на процесс изменения плотности ее пород, был активен в течение всего альпийского периода развития структуры от начала осадконакопления до современного этапа, то можно попытаться оценить изменения структуры земной коры и мантии как изменения плотности пород и мощности соответствующих обобщенных слоев литосферы на каждом этапе такого развития.

Первая работа, частично направленная на изучение этих эффектов, была выполнена В.Г. Трифоновым [Trifonov, 2012; Trifonov, Sokolov, 2014]. Для Большого Кавказа в рамках идеи сохранения изостатического равновесия структуры им была проведена оценка следующих параметров для некоторых частей региона: а) строения земной коры и осадочного чехла перед сокращением и складчатостью: плотности и мощности слоев коры, б) величин сокращения (по литературным данным) и, в соответствии с ней, расчетных новых мощностей слоев коры и величин результирующего поднятия, в) характера дополнительных преобразований пород коры и мантии (уплотнения или разуплотнения) для приведения в соответствие друг другу расчетных и природных амплитуд поднятия. Целью исследований было определение роли горизонтального сжатия в неотектоническом поднятии. В.Г. Трифоновым было выявлено, что для сохранения изостатического равновесия современной структуры после сокращения и соответствующего увеличения мощностей всех слоев коры (при учете вполне определенных традиционных оценок амплитуд поднятия) требуется внести в модель дополнительное разуплотнение пород коры в северных блоках Большого Кавказа и уплотнение - в южных. Таким образом, В.Г. Трифонов определил, что роль «горизонтального сжатия» (укорочения структуры) в неотектоническом поднятии была существенной, но этот механизм не был единственным.

Воспользуемся частично этими идеями и принятыми в указанных работах плотностями пород мантии, коры и осадочного слоя. Для рассмотрения всего хода развития сначала было необходимо восстановить мощность коры для времени начала осадконакопления. Заметим, что этот этап в построениях В.Г. Трифонова не рассматривался. Хорошо известно, что севернее Главного Кавказского разлома на размытую поверхность палеозойских метаморфических пород повсеместно ложатся базальные конгломераты нижней юры (например, [Tuchkova, 2007]). Южнее Главного Кавказского разлома, в пределах Сванетского антиклинория, палеозойский фундамент демонстрирует структуру, отличающуюся по наклону осевых поверхностей и кливажа от ориентировок складок нижнеюрского чехла, что указывает на складчатость и размыв палеозойских пород, предваряющие накопление пород нижней юры [Somin, Belov, 1967]. Для нас эта информация важна как свидетельство нахождения поверхности структуры около уровня моря на момент начала осадконакопления. Это означает, что начальную структуру коры на всем пространстве Большого Кавказа можно принять как континентальную кристаллическую кору с плотностью о= =2.83 г/см³ (эта и другие плотности даются по [Trifonov, Sokolov, 2014]) и с мощностью 40 км (рис. 3, а), а плотность нижележащей мантии составляет 3.30 г/см³. Вес столба пород литосферы этой структуры до условной глубины изостатической компенсации в 100 км был принят нами за эталонный, к которому приводились другие исследуемые структуры. Для получения предварительного результата - характера изменения плотностей пород - проследим за развитием структуры коры только одной зоны – Чиаурской.

После накопления осадочного чехла от нижней юры до эоцена мощностью 15 км, перед началом складчатости, изостатически сбалансированная структура литосферы составляет условно (сверху вниз): 200 м воды (р=1.0 г/см³), 15.0 км осадков (р=2.50 г/см³) и 13.5 км кристаллической коры (расчетная величина $\rho = 2.83 \ г/см^3$), ниже ее, начиная с глубины 28.7 км, расположена мантия (р=3.30 г/см³). В.Г. Трифонов [Trifonov, 2012] оценивал мощность чехла и фундамента в «зоне южного склона» перед складчатостью, соответственно, в 18±2 км и 16±1 км с глубиной Мохо в 34±2 км. Таким образом, наши результаты принципиально совпадают с этими оценками. В соответствии с этими расчетами можно утверждать, что мощность слоя новой мантии (имеется в виду «мантийная» плотность пород). сформировавшейся по породам кристаллической коры, составит 26.5 км (40 км - 13.5 км). Подошва осадочного слоя и граница условной мантии (по плотности пород) показаны на рис. 3, б (специальные отметки 1 и 2, условный знак 11).

После горизонтального сокращения структур осадочного чехла и кристаллического слоя коры на 55 % (среднее сокращение и другие параметры даются для структур Чиаурской зоны по [Yakovlev, 2015], с. 288) новая мощность кристаллической части коры должна была составить 29.9 км, осадков –

33.3 км. Согласно расчетным параметрам сбалансированной структуры [Yakovlev, 2015], неотектоническое поднятие составило в среднем 12.3 км, а современная кровля фундамента находится на глубине 21.0 км (отметка 1, условный знак 11, рис. 3, в). Если высоту рельефа оценить в 2.5 км, то, соответственно, около 10 км пород чехла надо считать размытыми. Расчет изостатически уравновешенной структуры, с учетом объемов пород выше уровня моря, показал, что мощность кристаллической коры для нее в этом случае составит 19.3 км, что на 10.6 км меньше расчетной величины после сокращения. Следовательно, глубина Мохо по параметру плотности в рамках этой схемы составит 40.3 км (рис. 3, в, отметка 4 и граница М₁). Если к глубине кровли фундамента добавить полную мощность коры после сокращения, то мы получим глубину 51 км (рис. 3, в, отметка 2). То есть кристаллическая часть коры после сокращения и неотектонического поднятия потеряла относительно стадии 1 дополнительно слой современной мощностью 10.6 км, породы которого приобрели «мантийные» плотности (рис. 3, в, пространство между отметками 2 и 4). Этот слой до сокращения имел исходную мощность 4.8 км.

Здесь следует сразу отметить, что указанная выше расчетная глубина Мохо, по плотности пород составляющая 40.3 км, не соответствует данным, получаемым по материалам глубинного зондирования [Pavlenkova, 2012]. Согласно этим оценкам, глубина Мохо для Большого Кавказа по изменению скоростей сейсмических волн может составить около 55 км (рис. 3, в, граница М₂). Однако это не означает, что расчеты, приведенные выше, неверны. Вопервых, несмотря на существующую в целом прямую связь плотности пород и скорости распространения сейсмических волн разброс конкретных величин может быть существенным. В связи с этим установление скоростей на границе Мохо по определенным значениям плотности и наоборот не является простой задачей, имеющей единственное решение. Кроме того, в приведенных выше расчетах использована заведомо примитивная модель структуры коры, позволяющая оценить только самые общие тенденции. В природной структуре возможны другие варианты распределения плотностей. Так, в ([Pavlenkova, 2012], рис. 3, с. 19) в верхней части структуры до глубин 20 км как раз для Чиаурской зоны даются аномально высокие скорости сейсмических волн – 7.0–7.3 км/с на фоне величин 5.5-6.5 км/с для окружающих блоков. Если с такими значениями связывать локальное увеличение плотности пород, то есть если значительно усложнить плотностную модель, то расчетная (по плотности) глубина Мохо изостатически уравновешенной структуры может заметно увеличиться.



Рис. 3. Три стадии развития изостатически сбалансированной структуры коры и мантии на примере восточной части Большого Кавказа (использован рисунок из [*Yakovlev, 2012*]): (*a*) – в начале осадконакопления, кристаллическая кора имеет мощность 40 км; (*б*) – после осадконакопления, до формирования складчатости; (*в*) – после складчатости и горообразования, современная. Показано постепенное наращивание объемов мантийных по плотности пород, замещающих деградирующий слой кристаллической части коры; для Чиаурской зоны показаны расчетные границы, для остальных тектонических зон границы даются приблизительно.

1-5 – осадочные толщи разного возраста: 1 – палеогеновые, 2 – меловые, 3 – верхнеюрские, 4 – среднеюрские, 5 – нижнеюрские; 6 – кристаллическая кора; 7 – породы мантии доальпийские; 8 – породы мантии (по плотности), сформированные на разных стадиях альпийского развития; 9 – предположительный объем пород коры, сформированных на стадии неотектонического поднятия из ранее новообразованных мантийных; 10 – границы Мохо разного возраста (М – для начала юры, по плотностям, М1 – современная расчетная, по плотностям, М2 – обобщенная современная граница, по сейсмическим скоростям, глубина 50–55 км); 11 – расчетные границы изменения плотности пород, пояснения даются в тексте; 12 – тектонические зоны (1 – Дзирульский массив, 2 – Окрибо-Сачхерская зона, 3 – Чиаурская зона, 4 – Тфанская зона, 5 – Шахдагская зона, 6 – блоки Скифской плиты; зоны 3–5 относятся к Большому Кавказу); 13 – шкала значений плотностей пород, использованных при расчетах.

Fig. 3. Three stages of the development of the isostatically balanced structure of the crust and mantle in the eastern part of the Greater Caucasus (the figure after [*Yakovlev*, 2012]): (*a*) at the beginning of sedimentation, the crystalline crust is 40 km thick; (δ) – after sedimentation, before folding; (*a*) – after folding and orogeny, present-day stage. It is shown that the volume of the mantle-density rocks increases, and these rocks replace the degrading layer of the crystalline crust. The calculated boundaries of the Chiaur zone are shown. Boundaries for other tectonic zones are shown roughly.

1-5 – sedimentary layers of different ages: 1 – Paleogene, 2 – Cretaceous, 3 – Upper Jurassic, 4 – Middle Jurassic, 5 – Lower Jurassic; 6 – crystalline crust; 7 – pre-alpine rocks of the mantle; 8 – mantle-density rocks formed at different stages of the Alpine-type development; 9 – assumed volume of the crustal rocks formed at the stage of neotectonic uplifting from the previously newly-formed mantle rocks; 10 – Moho boundaries of different ages (M – at the beginning of Jurassic, according to densities, M1 – present-day, calculated, according to densities, M2 – generalized present-day boundary, according to seismic velocities, depth of 50–55 km); 11 – calculated boundaries of the changes in the rock density (see explanations in the text); 12 – tectonic zones (1 – Dzuril massif, 2 – Okribo-Sachkher zone, 3 – Chiaur zone, 4 – Tfan zone, 5 – Shakhdag zone, 6 – blocks of the Scythian plate; zones 3–5 belong to the Greater Caucasus); 13 – rock density values used in calculations.

Отметим также совпадение границы Мохо по скоростям сейсмических волн (рис. 3, *в*, граница M₂) и расчетной глубины новой, после сокращения, но без учета «изостазии», подошвы коры (рис. 3, *в*, отметка 2). Разумеется, в настоящее время нет возможности что-либо говорить о случайности или закономерности такого совпадения. Если посмотреть на этом этапе положение пород, принадлежавших границе Мохо при начале осадконакопления (граница М, рис. 3, В), то обнаруживается ее очень большая глубина – около 100 км (без учета уплотнения пород).

Интересные данные дает попытка уточнения изменений структуры коры в процессе неотектонического поднятия. Если перед формированием гор, но после складчатости и укорочения структуры, что по времени составит около 15 млн лет назад, мощность смятого в складки осадочного чехла составит 30 км (с этой же глубиной подошвы чехла), то в изостатически уравновешенной структуре с теми же значениями плотностей пород на кристаллическую кору останется только 4 км мощности (рис. 3, в, отметка 3 в современной структуре). С одной стороны, это означает, что деградация мощности кристаллической коры могла достигать на тот момент 25 км из 30 км, что существенно больше современной «потери» мощности. Но с другой стороны, это означает также, что есть вероятность увеличения мощности кристаллической коры с 5-10 до 19.3 км в течение последних 15 млн лет в процессе неотектонического поднятия (рис. 3, в, знак 9, а также пространство между отметками 3 и 4, знак 11,), что вполне естественно, поскольку такое разуплотнение как раз и могло обеспечить общее поднятие структуры.

Таким образом, расчеты нескольких стадий развития изостатически уравновешенной структуры Чиаурской зоны показали почти постоянную деградацию кристаллической коры и увеличение плотности ее пород до «мантийных» значений. Вероятнее всего, этот вывод не относится к этапу неотектонического поднятия, во время которого мощность кристаллической части коры, деградировавшая при сокращении и складчатости, до некоторой степени восстановилась. Как уже указывалось ранее [Yakovlev, 2012], при этом породы, принадлежавшие уровню первоначальной границы Мохо (с учетом мощности коры в 40 км, на начало юры, около 190 млн лет назад), сейчас находятся на глубине около 100 км.

5. Обсуждение

Полученные уточненные материалы по числу и характеру факторов, или иначе – геодинамических процессов, являются существенно новыми для тектоники и геодинамики и могут обсуждаться с очень разных позиций. Например, связь двух обнаруженных процессов – «изостазии» и «сокращения» – со структурами определенного масштаба (вся кора и верхняя мантия) в ряду других процессов, действующих в структурах нескольких иерархических уровней, в том числе процессов тектонофизического, а не геодинамического характера, уже обсуждалась ([Yakovlev, Gorbatov, 2017a], с. 1001, 1015). В данной статье остановимся в основном на двух аспектах – во-первых, обсудим, каково количество механизмов или процессов – насколько они являются «модельными» или «природными», и, во-вторых, рассмотрим подробнее изостатические процессы – насколько они развиты в природе и в достаточной ли мере они учитываются в теоретических геодинамических моделях.

В настоящий момент такие геодинамические процессы, которые были бы связаны с длительной историей формирования блоков коры и мантии и которые бы надежно выделялись в результате анализа природных данных, фактически не используются в геодинамических моделях. Это связано с определенной особенностью современного этапа развития геодинамики, который можно назвать «умозрительным». В его рамках в настоящий момент доступны только прямые измерения современных деформационных процессов или процессов в геофизических полях, которые охватывают первые десятилетия или столетия. В условиях отсутствия другой информации интерпретация таких измерений модельным, волевым решением распространяется на десятки и сотни миллионов лет назад. Предполагаемые в рамках тектоники плит как основной теоретической концепции геодинамики движения в ячейках тепловой мантийной конвекции исследуются прямыми моделями механики с целью получения таких данных по вязкостным свойствам и амплитудам перемещений, которые бы в целом не противоречили теоретическим моделям. Сведения о реально существующих больших деформациях, определяемые по геологической информации на «геологических» временах, не привлекаются. На таком утверждении можно настаивать, поскольку в настоящий момент не существует детальных систематически полученных количественных данных о таких деформациях земной коры: представленные обобщения по сбалансированной структуре осадочного чехла Большого Кавказа [Yakovlev, 2015; Yakovlev, Gorbatov, 2017a] являются пока почти единственными. К сожалению, это означает, что любые представления о механизмах формирования структур земной коры на длительных, «геологических» временах не подкреплены количественным наблюдаемым материалом, а значит, являются предположительными, умозрительными. Заметим, что большое число деформационных моделей с очень качественно и детально выполненными расчетами фактически не опираются на природный наблюдаемый материал и обычно основаны на предположении о действии какоголибо единственного механизма. Например, к одним из последних достижений относятся модели конвективного типа, использующие подходы термомеханики, охватывающие материал коры и верхней мантии и имеющие большие деформации на «геологических» временах (например [Cloetingh et al., 2013]). Но указанная модель имеет только один контрольный параметр – рельеф поверхности и его развитие. Понятно, что вопрос о полноте соответствия такой модели природным структурам является как минимум дискуссионным. Можно также упомянуть большое число моделей, получающих амплитуду сокращения пространства из величин мощности коры в орогенных областях (например [Avouac, Tapponnie, 1993]), в которых также заложено только одно свойство - постоянство объема земной коры, причем соблюдение этого свойства в природе на геологических по длительности отрезках времени как единственно возможного варианта ничем не подтверждается. Упомянутые выше, в разделе 4 работы В.Г. Трифонова [Trifonov, 2012; Trifonov, Sokolov, 2014], предполагающие дополнительные изменения плотности пород в пределах Большого Кавказа в процессе укорочения структуры и ее неотектонического поднятия, очевидным образом ставят под сомнение корректность таких простых моделей с действием единственного механизма.

В этом отношении получение на основе статистического анализа ряда природных параметров таких результатов, которые прямо указывают на действие в природе именно двух процессов, является существенно важным обстоятельством для дальнейшего развития моделей геодинамики, поскольку учет этих результатов сильно ограничит число моделей, используемые механизмы которых в настоящий момент чаще всего являются умозрительными и выбор которых очень слабо обоснован природными наблюдениями.

Отметим также достаточно важный вопрос о том, какое количество механизмов одновременно используется в геодинамических моделях. Как уже было сказано выше, в современных моделях обычно используется только один механизм. По нашим данным, достаточно редко говорится об одновременном или разделенном во времени действии двух механизмов. Например, в ряде работ было показано, что при горообразовании в пределах Тянь-Шаня действовали два механизма – укорочение и андеплейтинг (наращивание земной коры снизу) [Yakovlev, Yunga, 2001; Trifonov et al., 2008].

Найденное при факторном анализе действие «изостазии» как явления, отвечающего за сохранение глубины кровли фундамента при формировании складчатой структуры и горного сооружения, необходимо связано с изменением плотности пород коры и верхней мантии. Сразу заметим, что в рамках концепций как фиксизма, так и мобилизма такие преобразования обычно не входят в число важных и обсуждаемых явлений; плотности пород основных слоев коры и мантии в таких моделях в настоящий момент чаще всего считаются постоянными. В конце прошлого века разрабатывались модели фазовых превращений пород на границе Мохо под влиянием ряда факторов, в том числе при изменениях температурного режима, при небольших растяжениях коры и последующем накоплении осадочного чехла [Gliko, Yefimov, 1978; Vadkovsky, Rodkin, 1986; Mareschal, Gliko, 1991]. В современных исследованиях в рамках этого направления актуальным остается изучение преобразований «габбро-эклогит» (например, в [Artyushkov, 1993, 2007]), с помощью которых объясняется, в частности, возникновение глубоких осадочных бассейнов. Между тем возникновение на месте континентальных блоков коры современных глубоководных структур с корой океанического или субокеанического типа считается обычным явлением, например на пассивных окраинах континентов или в глубоководных впадинах современного Средиземноморья. Это регистрируется наличием базальных терригенных осадков в основании многокилометровых континентальных толщ, залегающих под морскими осадками с угловым несогласием на размытой поверхности подстилающих структур, например по периферии Атлантического океана на границах пассивных окраин континентов [Kingston et al., 1983]. К обоснованию этого явления можно добавить известные эмпирические данные об ограниченном наборе вариантов строения блоков коры, имеющих определенную высоту рельефа, континентальная кора с мощностью 75-80 км под высочайшими горными массивами и океаническая кора мощностью 5-10 км под глубоководными желобами являются крайними членами этого ряда. Это означает, что любые существенные вертикальные движения блоков коры происходят при изменении строения коры - мощности ее слоев и плотности слагающих ее пород. В последнее время в работах, объясняющих происхождение как структур неотектонического поднятия, так и областей значительного погружения, явление непостоянства плотности пород (или изменения расчетной мощности слоев коры с определенной плотностью) используется все чаще (например [Artyushkov, Chekhovich, 2014, 2015; Trifonov, Sokolov, 2014]). Для иллюстрации можно привести известный пример поднятия нагорья Тибета от 1 до 5 км высоты за последние 4 млн лет (смотри [Trifonov, Sokolov, 2014]). Достаточно очевидно, что в этом случае мощность коры должна была увеличиться примерно с 45 км почти до 75 км. Разумеется, это не могло произойти без значительного разуплотнения пород. Весьма вероятно при этом, что породы мантии заметного объема приобрели плотности пород коровых. Таким образом, следует принять к сведению, что изменения плотности пород коры и мантии в пределах 10–15 % – достаточно обычное явление.

С этих позиций вся история развития структуры альпийского Большого Кавказа от начала осадконакопления до настоящего времени может рассматриваться как результат почти непрерывного изменения плотностей пород коры в сторону их увеличения, в результате чего нижняя часть бывшей коры в конечном счете приобретает мантийные плотности [Yakovlev, 2008с, 2012], что было специально рассмотрено в разделе 4 статьи. В этом смысле фактор «изостазия» является практически постоянно действующим на длительных отрезках времени, в отличие от «сокращения», которое было активно главным образом относительно короткое время.

Дополнительно обсудим несколько аспектов, связанных с тем, насколько представительным в региональном отношении является использованный натурный материал и насколько полученные данные по «изостазии» расширяют имеющиеся представления об этом явлении.

Несмотря на относительную незначительность общей длины профилей для очень большой площади Большого Кавказа (1000 км × 50-70 км), в целом имеющийся материал можно считать достаточно представительным. Для Северо-Западного Кавказа были исследованы восемь профилей (общей длиной 350 км), по совокупности охватывающих и северный, и южный борт структуры. Заметим, что обычное свойство линейных складчатых сооружений сохранять главные черты складчатой структуры почти на всем своем протяжении по простиранию в полной мере характерно и для Большого Кавказа. В силу особенностей структуры осталась неохарактеризованной только центральная часть Кавказа, в которой на большой площади на поверхности обнажаются структуры кристаллического фундамента и, соответственно, альпийская складчатость чехла отсутствует. Таким образом, можно считать, что основные свойства структуры осадочного чехла охарактеризованы достаточно полно.

Важным аспектом является возможное соотношение полученных для Большого Кавказа результатов с процессами формирования иных складчатонадвиговых структур. Напомним, что обсуждаемая линейная структура является автохтонной, не имеющей общего детачмента [Yakovlev, 2015], поэтому вся история развития каждой «структурной ячейки» здесь принадлежит одному блоку коры. Не все структуры имеют такое свойство. По последним данным, например, многие альпийские дугообразные сооружения в пределах Средиземноморья за последние 20–30 млн лет сформировались в основном за счет центробежного движения типа "roll-back" [Jolivet et al., 2006; Matenco et al., 2012], a не пододвигания тектонических плит под них. Фронт аккреционных призм в соответствии с этой схемой смещался на 200-500 км в направлении современных глубоководных впадин, и первоначальная связь наблюдаемой верхней части этих структур с глубокими горизонтами коры и мантии, естественно, нарушалась. Разумеется, такие аллохтонные структуры имеют принципиально иное происхождение, чем Большой Кавказ. Соответственно, использованный подход и полученные результаты, включая наличие процессов «изостазии» и «сокращения», не могут быть соотнесены с такими структурами. Сходного результата можно ожидать только для других автохтонных складчатых сооружений.

В обсуждаемом результате «изостазия» регистрируется в «структурных ячейках», горизонтальный размер которых на один-два порядка меньше тех обычных современных структур, для которых фиксируются аномалии силы тяжести, т.е. для горных сооружений, островных дуг и глубоководных желобов шириной в сотни километров. Важно, что в этих обычных случаях размеры минимальных структур сопоставимы с мощностью литосферы. Заметим, однако, что в классических описаниях истории развития геосинклиналей (зон коллизии в современной терминологии) отмечается на разных этапах наличие большой раздробленности коры ([Belousov, 1989], с. 149), в том числе при участии движений блоков коры по крупным разломам. Для Большого Кавказа это выражается в наличии первоначально узких, шириной от 5-10 до 50-70 км, тектонических зон, имеющих свой особенный стратиграфический разрез (как по формационному характеру осадков, так и по их мощности), что можно интерпретировать как отражение в истории развития этих соседних блоков ситуации, весьма неоднородной в проявлении изостазии. Так, в восточной части Тфанской зоны в пяти профилях обнаружен продольный по отношению к этой зоне разлом, разделяющий две «ячейки» доскладчатой структуры шириной около 10 км каждая (их наблюдаемая длина по простиранию 50-100 км), местами с разной мощностью осадочного чехла. Между этими ячейками регистрируется разлом с современным расчетным и весьма устойчивым по простиранию смещением кровли фундамента амплитудой до 10 км и с разной амплитудой неотектонического поднятия [Yakovlev, 2012]. Этот разлом хорошо выражен и в современной складчатой структуре. Таким образом, в геодинамических моделях тектонически активных структур, связанных с действием изостазии, следует предусмотреть возможность существования, кроме обычных, относительно «изометричных», также и узких блоков (до 10 км) с вертикальной мощностью, сопоставимой с мощностью литосферы (около 100 км).

В данной работе термин «изостазия» используется для обозначения свойства структуры возвращать границу «чехол/фундамент» на тот уровень, который она приобрела перед сокращением и складчатостью. Достаточно очевидно, что такое содержание термина отличается от общепринятого, связанного по большей части с современным «геофизическим» его наполнением - свободным «гидростатически уравновешенным» положением блоков коры в мантии, на мгновенных по геологическим меркам отрезках времени. В обсуждаемом случае термин «изостазия» является больше «геологическим», чем «геофизическим», - он описывает дополнительные свойства коры, которые ранее слабо использовались: сохранение изостатического равновесия на отрезках времени в миллионы и сотни миллионов лет и значительные изменения плотности пород литосферы. Возможно, в будущем, после более детального изучения охарактеризованного здесь процесса «изостазии», будет правильным ввести в обиход для его обозначения либо другой термин, либо какую-то модификацию существующего термина.

Коротко отметим существенное обстоятельство, связанное с весьма вероятным, как было показано в статье, изменением плотностей пород – как их уплотнением, так и разуплотнением. Вне зависимости от пока неизвестной природы таких изменений, явление может играть существенную роль в тектогенезе как источник локальных вариаций поля напряжений структур разного масштаба и их деформаций – горизонтального сокращения или удлинения. Вполне очевидно, что в современных геодинамических моделях такая возможность тоже пока никак не учитывается.

Нельзя не отметить также одно дополнительное важное обстоятельство. На все указанные здесь выявленные закономерности могут накладываться процессы глобального характера, связанные с этапом неотектонической активизации, который развивается примерно последние 20 млн лет. Это означает, что на сугубо местные причины тектонической (геодинамической) активности, зафиксированные в действии «изостазии» в масштабах «структурных ячеек» и тектонических зон в пределах Большого Кавказа, могут накладываться более общие процессы, которые исследователями связываются, в частности, с потоками флюидов при активизации структур регионального и планетарного масштаба [Artyushkov, Chekhovich, 2015; Trifonov, Sokolov, 2014]. Воздействие флюидов обеспечивает разуплотнение пород коры и мантии и соответствующее воздымание структур, в том числе в пределах платформ. В этом отношении можно привести пример поднятия до высоты 3 км Лабино-Малкинской тектонической зоны в районе Эльбруса на Большом Кавказе, расположенной севернее Пшекиш-Тырныаузского разлома, в пределах Скифской плиты, которая на альпийском этапе развития до неогена демонстрировала свойства типичной платформы. В связи с этим можно предположить, что в будущем встанет задача разделения пока единого геодинамического процесса «изостазии» на локальную и глобальную составляющие.

6. Заключение

В статье представлено детальное описание порядка применения метода факторного анализа к массиву параметров сбалансированной складчатой структуры Большого Кавказа. На этапе предварительных вычислений определяется число действующих факторов, которое используется при последующих операциях. Использование нескольких методов анализа показало результаты в виде двух факторов с устойчивым набором факторных нагрузок признаков.

Кроме того, в статье объясняются принципы интерпретации полученных факторных нагрузок. Для каждого фактора выбирается ведущий признак с высокой нагрузкой, с которым связаны (от которого зависят) другие признаки с высокими нагрузками. Если распределение нагрузок не поддается интерпретации, такие расчеты игнорируются.

По надежным статистическим критериям (по долям объясненной дисперсии) уточнены соотношения двух ранее выделенных факторов или геодинамических процессов формирования структуры Большого Кавказа – F1 «изостазия» и F2 «сокращение». Показано, что они имеют примерно одинаковый вес (46.6 % для F1 и 40.2 % для F2).

Расчеты возможных изменений структуры коры и мантии Большого Кавказа на альпийском этапе, а также обсуждение значения полученных результатов для геодинамики показали, что процесс «изостазии», при котором происходят значительные изменения плотности пород коры и, весьма вероятно, мантии, действует при развитии складчато-надвиговых структур практически постоянно, начиная с этапа осадконакопления, и должен учитываться в геодинамических построениях.

7. Благодарности

Семен Иойнович Шерман весной 2017 года принял в качестве рецензента деятельное участие в появлении первой журнальной статьи авторов по материалам факторного анализа. Это было не случайно – Семена Иойновича всегда отличали очень живой интерес к новым методам изучения геологических объектов и благожелательное отношение к исследователям, которые их развивают. Первый автор, Ф.Л. Яковлев, с благодарностью вспоминает плодотворные дискуссии с С.И. Шерманом по проблемам, связанным с формированием складчатых структур. Авторы благодарят анонимного рецензента за внимательное прочтение данной статьи и сделанные замечания. Это позволило выявить несколько аспектов полученного результата, важных для понимания разных сторон геодинамики, включая соотношение установленного механизма, названного «изостазией», с известным одноименным явлением. Обсуждение этих аспектов было добавлено в текст статьи.

8. Литература / References

- Artyushkov E.V., 1993. Physical Tectonics. Nauka, Moscow, 456 p. (in Russian) [Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.].
- *Artyushkov E.V.,* 2007. Formation of the superdeep South Caspian basin: subsidence driven by phase change in continental crust. *Russian Geology and Geophysics* 48 (12), 1002–1014. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.007.
- *Artyushkov E.V., Chekhovich P.A.,* 2014. Neotectonic uplift of Early Precambrian cratons caused by metamorphism with rock expansion in the earth crust. *Doklady Earth Sciences* 458 (2), 1215–1219. https://doi.org/10.1134/S1028334X14100158.
- Artyushkov E.V., Chekhovich P.A., 2015. Deep sedimentary basins in the waters of the Russian Arctic: mechanisms of formation, oil and gas potential, the rationale of belonging to the continental shelf. Arctic: Ecology and Economy (2), 26–34 (in Russian) [Артюшков Е.В., Чехович П.А. Глубокие осадочные бассейны в акватории российской Арктики: механизмы образования, перспективы нефтегазоносности, обоснование принадлежности к континентальному шельфу // Арктика: экология и экономика. 2015. № 2. С. 26–34].
- Avouac J.P., Tapponnier P., 1993. Kinematic model of active deformation in Central Asia. *Geophysical Research Letters* 20 (10), 895–898. https://doi.org/10.1029/93GL00128.
- Belousov V.V., 1989. The Basics of Geotectonics. 2-nd edition. Nedra, Moscow, 382 p. (in Russian) [Белоусов В.В. Основы геотектоники. 2-е изд. М.: Недра, 1989. 382 с.].
- Вогпуакоv S.A., Sherman S.I., 2000. Multilevel self-organization of destruction in a shear zone (data of physical modeling). Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics) 3 (4), 107–115 (in Russian) [Борняков С.А., Шерман С.И. Многоуровневая самоорганизация деструктивного процесса в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) // Физическая мезомеханика. 2000. Т. З. №. 4. 107–115].
- *Cloetingh S., Burov E., Francois T.,* 2013. Thermo-mechanical controls on intra-plate deformation and the role of plume-folding interactions in continental topography. *Gondwana Research* 24 (3–4), 815–837. https://doi.org/ 10.1016/j.gr.2012.11.012.
- Gliko A.O., Yefimov A.B. 1978. About the movement of phase border due to a perturbation of a deep thermal stream. Izvestiya AN SSSR, Seriya Fizika Zemli (7), 11–21 (in Russian) [Глико А.О., Ефимов А.Б. О движении фазовой границы при возмущении глубинного теплового потока // Известия АН СССР, серия Физика Земли. 1978. № 7. С. 11–21].
- Gorbatov E.S., Yakovlev F.L., 2016. The study of geodynamic development of a structure of Greater Caucasus by methods of multidimensional statistics. In: The scientific conference of young scientists and graduate students of IPE RAS. Theses of reports and program of the Conference (Moscow, April 25–26, 2016). IPE RAS, Moscow, p. 27 (in Russian) [Горбатов Е.С. Яковлев Ф.Л. Изучение геодинамического развития сооружения Большого Кавказа методами многомерной статистики // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов и программа конференции (25–26 апреля 2016 г., г. Москва). М.: ИФЗ РАН, 2016. С. 27].
- *Jolivet L., Augier R., Robin C., Suc J.P., Rouchy J.M.,* 2006. Lithospheric-scale geodynamic context of the Messinian salinity crisis. *Sedimentary Geology* 188–189, 9–33. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.02.004.
- Kaiser H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. Educational and Psychological Measurement 20 (1), 141–151. https://doi.org/10.1177/001316446002000116.
- Kim J.O., Mueller C.W., Klekka W.R., Aldenderfer M.S., Blashfield R.K., 1989. Factorial, Discriminant and Cluster Analysis. Finansy i Statistika, Moscow, 215 p. (in Russian) [Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р., Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.].
- Kingston D.R., Dishroon C.P., Williams P.A., 1983. Global basin classification system. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 67 (12), 2175–2193.
- *Mareschal J.-C., Gliko A.O.,* 1991. Lithosphere thinning, uplift and heat flow preceding rifting. *Tectonophysics* 197 (2–4), 117–126. https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90036-R.
- Matenco L., Radivojević D., 2012. On the formation and evolution of the Pannonian Basin: Constraints derived from the structure of the junction area between the Carpathians and Dinarides. *Tectonics* 31 (6), TC6007. https://doi.org/ 10.1029/2012TC003206.

- Mosar J., Kangarli T., Bochud M., Brunet M-F., Glasmacher U.A., Rast A., Sosson M., 2010. Cenozoic-Recent tectonics and uplift in the Greater Caucasus: a perspective from Azerbaijan. In: M. Sosson, N. Kaymakci, R.A. Stephenson, F. Bergerat, V. Starostenko (Eds.), Sedimentary Basin Tectonics from the Black Sea and Caucasus to the Arabian platform. Geological Society, London, Special Publications, vol. 340, p. 261–280. https://doi.org/10.1144/SP340.12.
- Pavlenkova G.A., 2012. Crustal structure of the Caucasus from the Stepnoe-Bakuriani and Volgograd-Nakhichevan DSS profiles (reinterpretation of the primary data). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 48 (5), 375–384. https:// doi.org/10.1134/S1069351312040040.
- Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P., 2007. Interpretation of chaotic jointing near fault planes: a new approach. Russian Geology and Geophysics 48 (3), 257–266. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.02.009.
- Sherman S.I., 2005. The nonstationary tectonophysical model of faults and its application to analysis of the seismic process in destructive zones of the lithosphere. *Fizicheskaya Mezomekhanika (Physical Mesomechanics*) 8 (1), 71–80 (in Russian) [Шерман С.И. Нестационарная тектонофизическая модель разломов и ее применение для анализа сейсмического процесса в деструктивных зонах литосферы // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 71–80].
- Sherman S.I., 2012. Destruction of the lithosphere: Faultblock divisibility and its tectonophysical regularities. Geodynamics & Tectonophysics 3 (4), 315–344 (in Russian) [Шерман С.И. Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонофизические закономерности // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т.З. № 4. С. 315–344]. https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0077.
- Sherman S.I., Gladkov A.S., 1999. Fractals in studies of faulting and seismicity in the Baikal rift zone. *Tectonophysics* 308 (1–2), 133–142. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00083-9.
- Soloviev A.V., 2008. Investigation of the Tectonic Processes at Convergent Setting of the Lithospheric Plates. Fissiontrack Dating and Structural Analyses. Nauka, Moscow, 319 p. (in Russian) [Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит: методы трекового датирования и структурного анализа. М.: Наука, 2008. 319 с.].
- Somin M.L., Belov A.A., 1967. To the history of tectonic development of a zone of the Southern slope of Greater Caucasus. Geotektonika (Geotectonics) (1), 41–50 (in Russian) [Сомин М.Л., Белов А.А. К истории тектонического развития зоны южного склона Большого Кавказа // Геотектоника. 1967. № 1. С. 41–50].
- *Trifonov V.G.*, 2012. Problems of mountain building: Alpine-Himalayan belt. In: Tectonophysics and actual problems of the earth sciences. Proceedings of the Third tectonophysical conference. Vol. 1. IPE RAS, Moscow, p. 99–109 (in Russian) [*Трифонов В.Г.* Проблемы горообразования (Альпийско-Гималайский пояс) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы Третьей тектонофизической конференции. М.: ИФЗ РАН, 2012. Т. 1. С. 99–109].
- Trifonov V.G., Dodonov A.E., Bachmanov D.M., Vishnyakov F.A., Artyushkov E.V., Mikolaichuk A.V., 2008. Pliocene-Quaternary orogeny in the Central Tien Shan. Russian Geology and Geophysics 49 (2), 98–112. https://doi.org/ 10.1016/j.rgg.2007.06.012.
- *Trifonov V.G., Sokolov S.Y.*, 2014. Late Cenozoic tectonic uplift producing mountain building in comparison with mantle structure in the Alpine-Himalayan belt. *International Journal of Geosciences* 5 (5), 497–518. https://doi.org/ 10.4236/ijg.2014.55047.
- Tuchkova M.I., 2007. Lithology of Lower-Middle Jurassic deposits of Great Caucasus (sedimentation, mineral composition, secondary transformations, paleogeographic and geodynamic consequences. Chapter 4. In: Yu.G. Leonov (Ed.), Alpine history of the Great Caucasus. GEOS, Moscow, p. 141–214 (in Russian) [*Тучкова М.И.* Литология нижне-среднеюрских отложений Большого Кавказа (осадконакопление, минеральный состав, вторичные преобразования) палеогеографические и геодинамические следствия // Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Ред. Ю.Г. Леонов. М.: ГЕОС, 2007. С. 141–214].
- Vadkovsky V.N., Rodkin M.V., 1986. Thermodynamics of shifts of M boundary. In: B.S. Volvovsky (Ed.), A structure and dynamics of a zone of transition from the continent to the ocean. Geodynamics researches, vol. 9. Interdepartmental Geophysical Committee at Presidium of Academy of Sciences of the USSR, Moscow, p. 91–96 (in Russian) [Вадковский В.Н., Родкин М.В. Термодинамика смещений границы М // Строение и динамика зон перехода от континента к океану / Ред. Б.С. Вольвовский. Геодинамические исследования, вып. 9. М.: Междуведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1986. С. 91–96].
- Yakovlev F.L., 2008a. The study of post-folding mountain building first results and approaches to mechanisms diagnostics on the North-West Caucasus example. In: Common and regional problems of tectonics and geodynamic. Proceedings of XLI Tectonic meeting. GEOS, Moscow, vol. 2, p. 510–515 (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Исследование постскладчатого горообразования – первые результаты и подходы к диагностике механизмов на примере Северо-Западного Кавказа // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики: Материалы XLI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 510–515].
- *Yakovlev F.L.*, 2008b. Multirank strain analysis of linear folded structures. *Doklady Earth Sciences* 422 (7), 1056–1061. https://doi.org/10.1134/S1028334X08070118.
- Yakovlev F.L., 2008c. Vladimir Vladimirovich Belousov and the problem of folding formation. *Geofizicheskiye Issledo*vaniya (Geophysical Researches) 9 (1), 56–75 (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Владимир Владимирович Белоусов и проблема происхождения складчатости // Геофизические исследования. 2008. Т. 9. № 1. С. 56–75].
- *Yakovlev F.L.*, 2009. Reconstruction of linear fold structures with the use of volume balancing. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 45 (11), 1025–1036. https://doi.org/10.1134/S1069351309110111.

F.L. Yakovlev, E.S. Gorbatov: On using the factor analysis to study the geodynamic processes...

- Yakovlev F.L., 2012. Reconstruction of the balanced structure of the eastern part of alpine Greater Caucasus using data from quantitative analysis of linear folding case study. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences (1), 191–214 (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Опыт построения сбалансированной структуры восточной части альпийского Большого Кавказа по данным количественных исследований линейной складчатости // Вестник КРАУНЦ, серия Науки о Земле. 2012. № 1. С. 191–214].
- Yakovlev F.L., 2015. Multirank Strain Analysis of Linear Folding on the Example of the Alpine Greater Caucasus. Doctoral thesis. IPE RAS, Moscow, 472 p. (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Многоранговый деформационный анализ линейной складчатости на примере альпийского Большого Кавказа: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ РАН, 2015. 472 с.].
- *Yakovlev F.L.*, 2017. Reconstruction of Folded and Faulted Structures in Zones of the Linear Folding Using Structural Cross-Sections. IPE RAS, Moscow, 60 p. (in Russian) [Яковлев Ф.Л. Реконструкция складчато-разрывных структур в зонах линейной складчатости по структурным разрезам. М.: ИФЗ РАН, 2017. 60 с.].
- Yakovlev F.L., Gorbatov E.S., 2016. An identification of the main processes of formation of the Alpine Greater Caucasus based on parameters of the balanced model of its structure (the factor analysis). In: Tectonophysics and topical issues of Earth sciences. Proceedings of the Fourth tectonophysical conference. Vol. 1. IPE RAS, Moscow, p. 304–313. (in Russian) [Яковлев Ф.Л., Горбатов Е.С., Выявление основных процессов формирования альпийского Большого Кавказа по параметрам сбалансированной модели его структуры (факторный анализ) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы Четвертой тектонофизической конференции. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 304–313].
- Yakovlev F.L., Gorbatov E.S., 2017a. The first experience in diagnosing the geodynamic mechanisms of folding by the factor analysis of folded structure parameters (Greater Caucasus). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 999–1019 (in Russian) [*Яковлев Ф.Л., Горбатов Е.С.* Первый опыт диагностики геодинамических механизмов формирования складчатой структуры с помощью факторного анализа ее параметров (Большой Кавказ) // *Геодинамика и тектонофизика.* 2017. Т. 8. № 4. С. 999–1019]. https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0329.
- Yakovlev F.L., Gorbatov Y.S., 2017b. About a role of process of an isostasy in formation of a sedimentary cover of Greater Caucasus, its folded structure and a mountainous uplift (the factor analysis). In: Dynamics of sedimentary basins and underlying lithosphere at plate boundaries and related analogues. Abstracts of ILP Sedimentary Basins 2017 Cyprus. Limassol, Cyprus, p. 25–26.
- Yakovlev F.L., Sorokin A.A., 2016. The comparison of geodynamic models of development of the Alpine Greater Caucasus in the "volume of eroded rock" parameter. In: Tectonophysics and topical issues of Earth sciences. Proceedings of the Fourth tectonophysical conference. Vol. 1. IPE RAS, Moscow, p. 314–322 (in Russian) [Яковлев Ф.Л., Сорокин А.А., Сопоставление геодинамических моделей развития альпийского Большого Кавказа по параметру «объем размытых пород» // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы Четвертой тектонофизической конференции. М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 314–322].
- *Yakovlev F.L., Yunga S.L.,* 2001. Crustal shortening during mountain building: A case study in the Pamir-Tien Shan and Altay-Mongolia region. *Russian Journal of Earth Sciences* 3 (5), 317–332.



Федор Леонидович Яковлев, докт. геол.-мин. наук, в.н.с. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия

CRCID ID https://orcid.org/0000-0002-4435-4279

Fedor L. Yakovlev, Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia



Евгений Сергеевич Горбатов, канд. геол.-мин. наук, с.н.с. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН 123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия

e-mail: e.s.gor@mail.ru ORCID ID https://orcid.org/0000-0002-0835-0692

Evgenii S. Gorbatov, Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS 10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia